

Do Capacity Constrained Bots Collude?

Presentasjon for Konkurransetilsynet, februar
2025

**John Sæten Lilletvedt og
Ole Kristian Dyskeland**

When Margrethe Vestager takes antitrust battle to robots

Self-teaching algorithms could collude in ways that are impossible to detect, much less prevent.



Motivasjon

Feb. 8, 2024, 11:00 AM GMT+1

ANALYSIS: Antitrust Bills Aim at AI Pricing Collusion

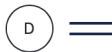


Eleanor Tyler
Legal Analyst



Recent bills introduced in the Senate aim to augment the current antitrust laws by calling out algorithmic collusion—which **can be**





Tina Søreide

Tina Søreide, konkurransedirektør

Innlegg

Kunstig intelligens utfordrer konkurransen

Velfungerende markeder er en forutsetning for vår velferd og samfunnsutvikling, men nå utfordres kontrollen med konkurranse på nye måter. EUs nye regler for kunstig intelligens kan være en del av løsningen.



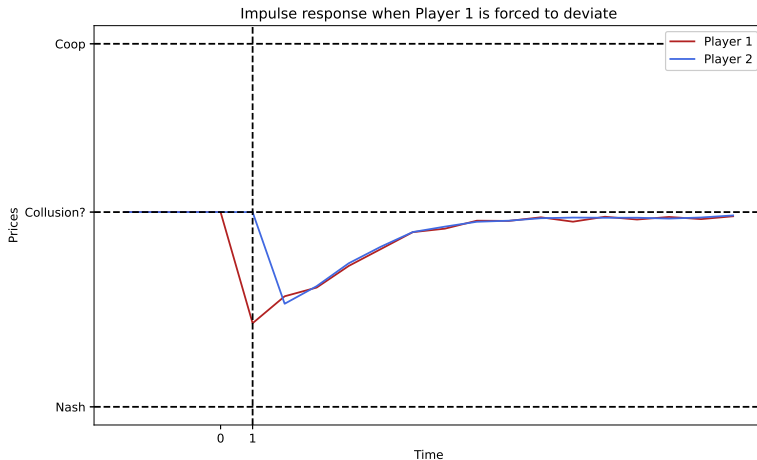
Artificial Intelligence, Algorithmic Pricing, and Collusion[†]

By EMILIO CALVANO, GIACOMO CALZOLARI, VINCENZO DENICOLÒ,
AND SERGIO PASTORELLO*

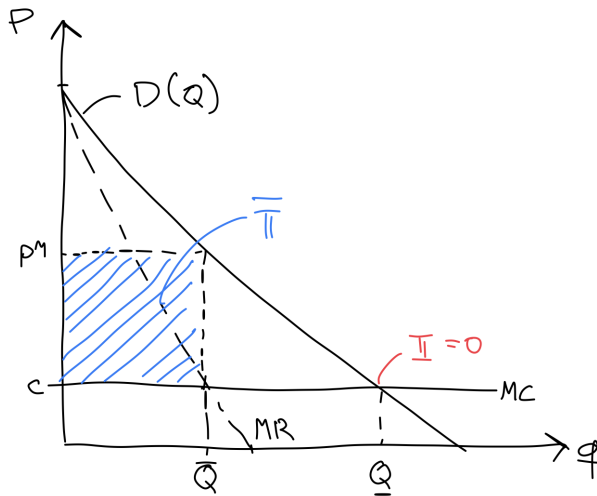
Increasingly, algorithms are supplanting human decision-makers in pricing goods and services. To analyze the possible consequences, we study experimentally the behavior of algorithms powered by Artificial Intelligence (Q-learning) in a workhorse oligopoly model of repeated price competition. We find that the algorithms consistently learn to charge supracompetitive prices, without communicating with one another. The high prices are sustained by collusive strategies with a finite phase of punishment followed by a gradual return to cooperation. This finding is robust to asymmetries in cost or demand, changes in the number of players, and various forms of uncertainty. (JEL D21, D43, D83, L12, L13)



Motivasjon (Resultat fra Calvano et al.)

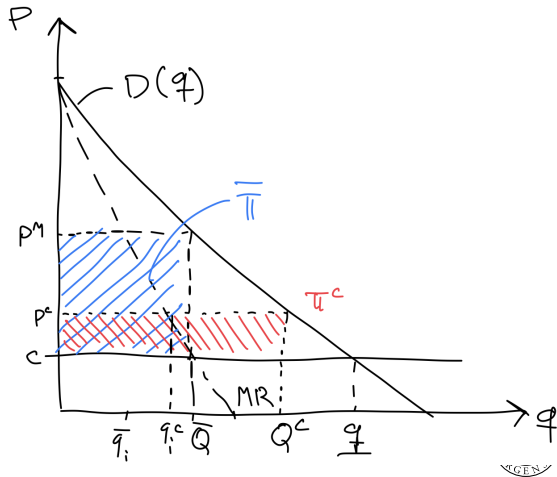


Bertrand og incentiver for samarbeid



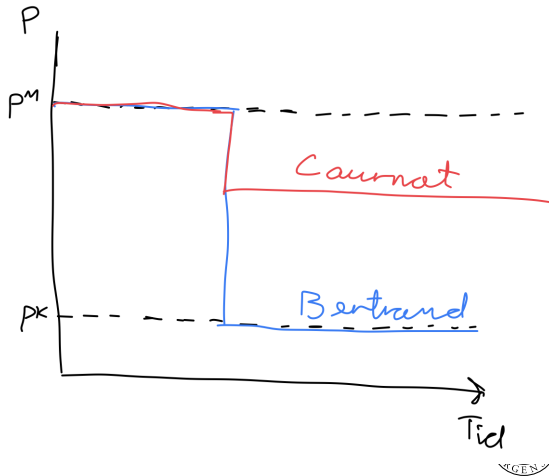
Samarbeid med kvantum

- Ved Bertrand er gevinsten ved samarbeid stort, men gevinsten fra avvik er også stort, og straffen er stor
 - Med Cournot er gevinsten ved samarbeid moderat, gevinsten fra avvik er lite, og straffen er svak
- Incentivene til å samarbeide er svært forskjellig avhengig av om det er pris eller kvantum som er bindende



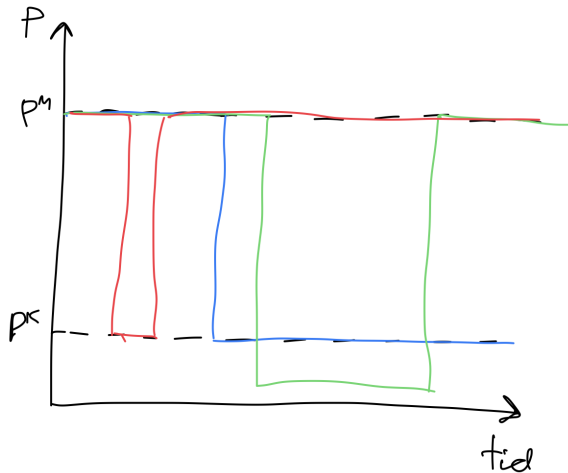
Samarbeid med kvantum: profitt

- Bertrand: $\underline{\pi}_i + \delta \underline{\pi}_i + \delta^2 \underline{\pi}_i + \dots = 0$
- Cournot: $\pi_i^C + \delta \pi_i^C + \delta^2 + \dots > 0$
- Samarbeid: $\bar{\pi}_i + \delta \bar{\pi}_i + \delta^2 \bar{\pi}_i + \dots$



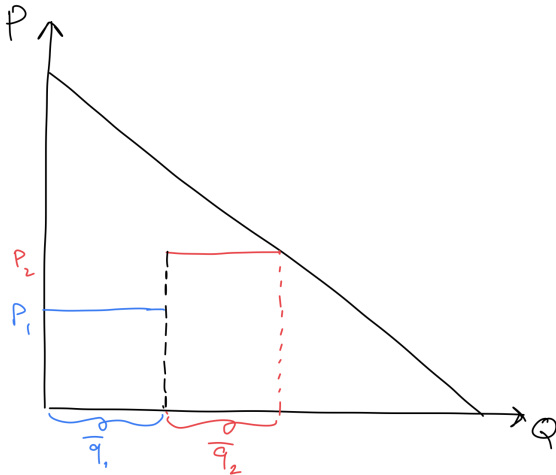
Samarbeid med kvantum: strategier

- Grim trigger: $p^M + 0 + 0 + \dots$
- Tit-for-tat (1): $p^M + 0 + p^M + \dots$
- Tit-for-tat (2): $p^M + p^M + 0 + p^M + \dots$
- Stick-and-carrot: $p^M + \tilde{p} + \tilde{p} + p^M + \dots$



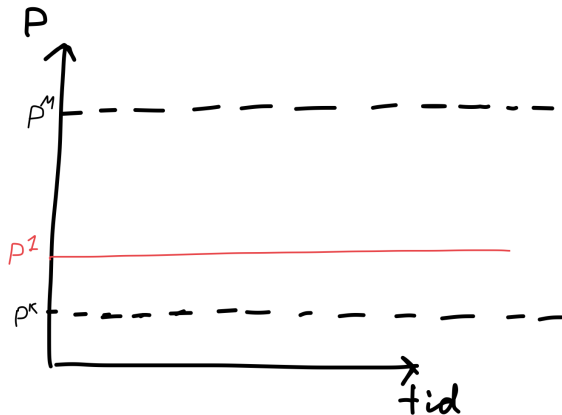
Kapasitetsbegrensninger

- Bedriftene har en gitt kapasitet/inventar, \bar{q}_i , men konkurrerer i priser
- Hvis $p_1 = \min\{p_1, p_2\}$, og $D(p_1) > \bar{q}_1$, så $D_2 = D(p_2) - \bar{q}_1 > 0$, dvs. begge kan ha salg ved forskjellige priser
- Effektiv rasjonering, de med størst betalingsvilje kjøper først.



Obsertvert pris

- Økonomisk teori abstraherer bort virkelighetens distraksjoner;
 - Empiri er bunnet til den realiserte verden
- Kan simulering forene dem i skjønn harmoni?



Akademisk bakteppe

- Fremskritt innen kunstig intelligens - AlphaGo, AlphaZero etc. (Silver, Huang mfl., 2016; Silver, Hubert mfl., 2018)
- Lignende teknologi brukes til prissetting (Chen, Mislove og Wilson, 2016; Brown og MacKay, 2023; Assad mfl., 2024; Spann mfl., 2024).
- Kan slike prisverktøy lære seg å samarbeide på egenhånd (Ezrachi og Stucke, 2016; Mehra, 2016)?
- Vanskelig å undersøke teoretisk (Bloembergen mfl., 2015) så vel som empirisk (Assad mfl., 2024).
- Calvano mfl. 2020 foreslo simulering av prisingsspill som en tredje metode.



Problemer og spørsmål

- Calvano mfl. 2020; 2021 argumenterer for at KI lærer strategier for prissamarbeid i gjentatte spill.
- Det finnes lignende resultater for dynamiske spill (Klein, 2021) og for auksjoner (Banchio og Skrzypacz, 2022).
- Men resultatene fra Calvano mfl. 2020 er ikke spesielt robuste (Eschenbaum, Mellgren og Zahn, 2022; Banchio og Mantegazza, 2022; Asker, Fershtman og Pakes, 2024).
- Om simuleringer skal ha ekstern relevans, forutsetter det at man tester etablerte resultater i ulike modelloppsett etc.
- Så vi spør: **Lærer KI å prissamarbeide når de har begrenset salgskapasitet?**
 - Forsmak: Lite tyder på prissamarbeid i streng forstand, men prisene er ofte høye og det er mye variasjon.



Teori

- Modellen vår er et Bertrand-Edgeworth-spill.
- Avhengig av antagelser kan utfallet av spillet være kvantumskonkurranse (Kreps og Scheinkman, 1983; Osborne og Pitchik, 1986) eller syklisk prising/miksing (Edgeworth, 1925; Davidson og Deneckere, 1986).
- Det er mange mulige utfall i gjentatte Bertrand-Edgeworth-spill (Brock og Scheinkman, 1985; Benoit og Krishna, 1987).
- Viktigst for oss: Antagelser om rasjonering og resultater på kapasitetssetting.



Metode

- Som Calvano mfl. 2020 bruker vi Q-læring.
- Forsterket læring: Læring gjennom valg for å oppnå et mål, gitt et miljø (en modell).
- Q-læring legger lite struktur på hvordan målet skal oppnås:
 - Kan være problematisk (Asker, Fershtman og Pakes, 2024).
 - Litt av poenget er imidlertid å se hva KI kan lære av strategier uten innblanding eller instruks.
 - Når vi spesifiserer rasjoneringsregler gir vi Klen mer instruksjon enn en grunnleggende Q-lærer.



Simulering

- To Q-lærere setter priser ut fra hva egen og motstanderens priser var i forrige periode.
- Profitt beregnes ut fra etterspørsel hvis denne er lavere eller lik kapasitet.
- Når Q-lærerene blir instruert i rasjonering vil profitt også avhenge av forhold mellom egen og motstanders pris.
- Et spill regnes som avsluttet når de to har spilt samme strategi i et gitt antall runder.
- Strategiene fra avsluttede spill blir testet på følgende måte:
 - De to blir bedt om å spille videre ut fra strategiene de endte opp med ved avsluttet spill.
 - Den ene blir så tvunget til å avvike fra sin strategi i en periode.
 - Deretter spiller de to ut fra det de har lært.



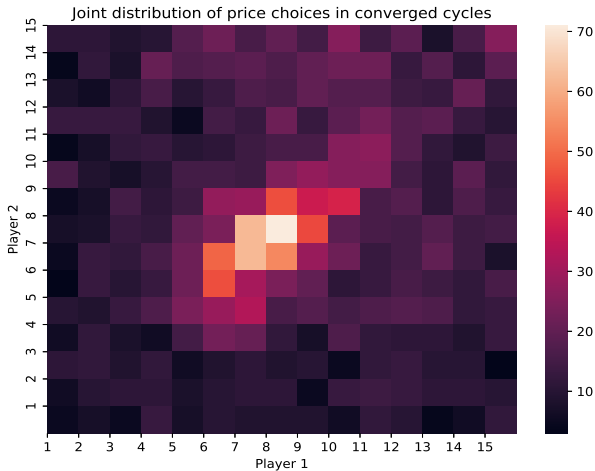
Evaluering av test

- Testen vi bruker for å evaluere prissamarbeid bygger på Harrington 2019: Problemet er metoden som brukes for å danne prissamarbeid.
- Slik sett har man prissamarbeid når bedrifter bruker strategier som belønner opprettholdelse av et gitt prisnivå og straffer avvik.
- I teorien har vi to slike strategier:
 - Grim-trigger.
 - Gulrot og pisk.
- Lærer Klen en slik strategi eller er det noe annet som ligger under det prisingsmønsteret vi observerer?

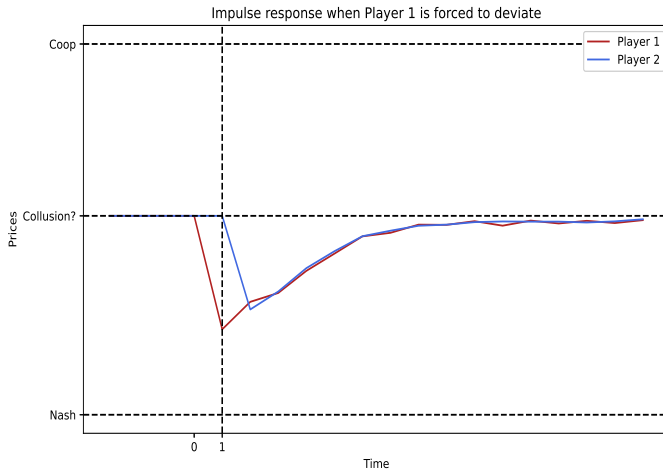


Resultater

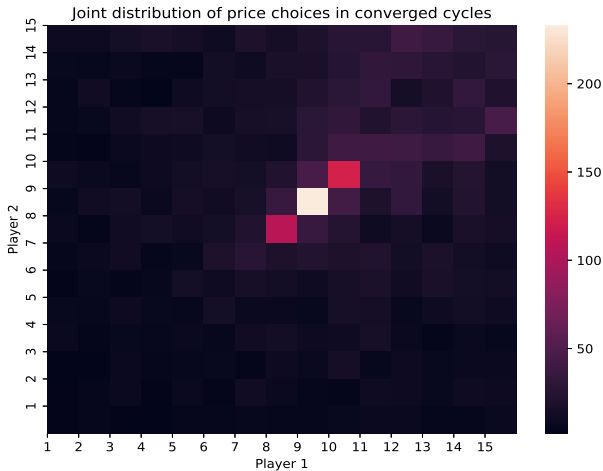
KI-prising som i Calvano mfl. 2020



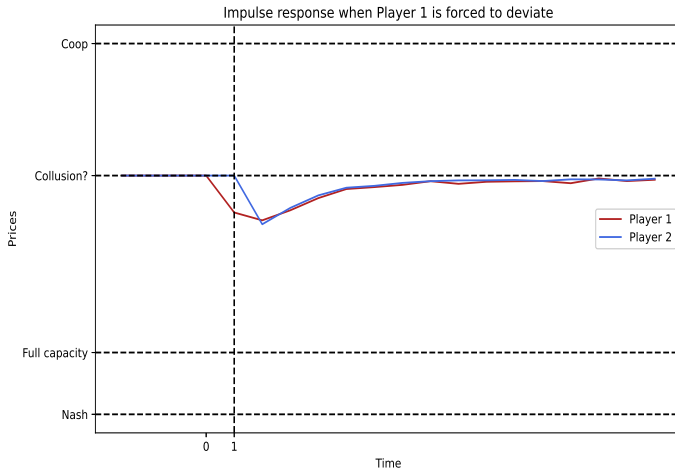
Samarbeid? - Replikasjon av Calvano mfl. 2020



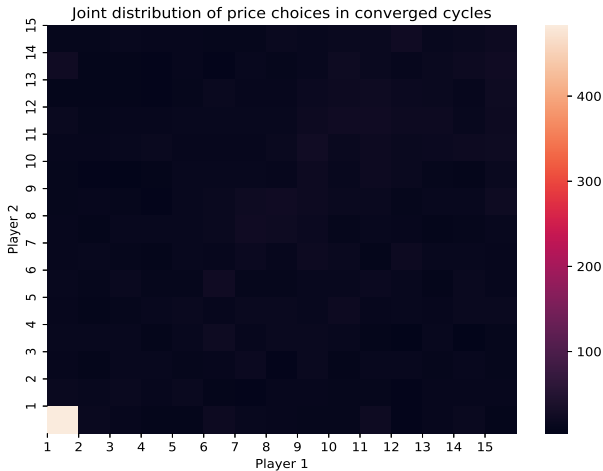
Prising under begrenset kapasitet



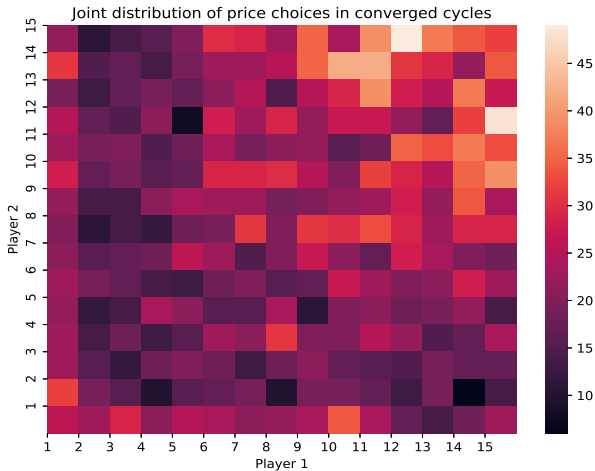
Gjør kapasitetsbegrensninger det enklere å samarbeide?



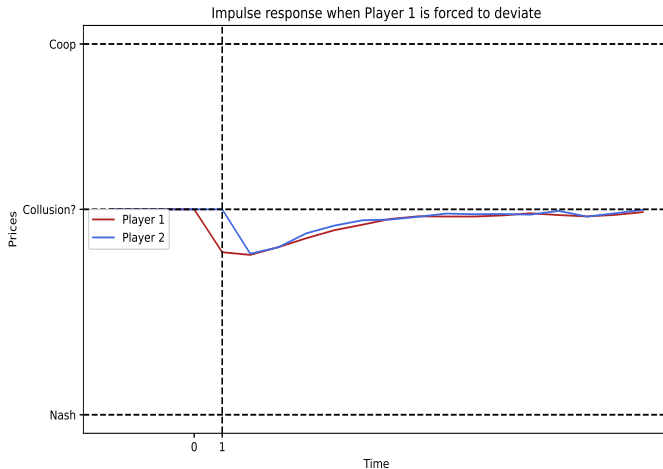
Prising med rasjoneringsregel I



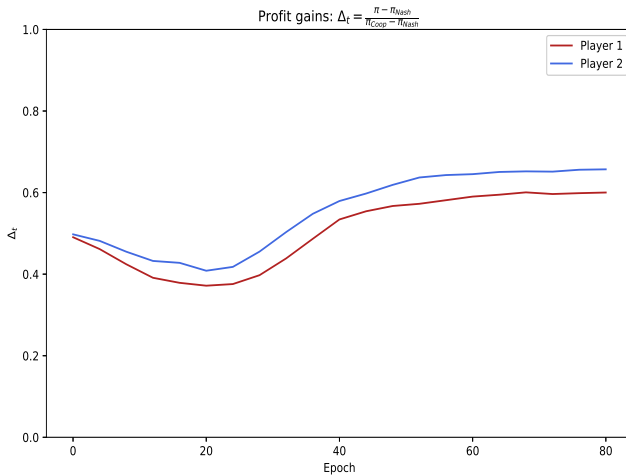
Prising med rasjoneringsregel II



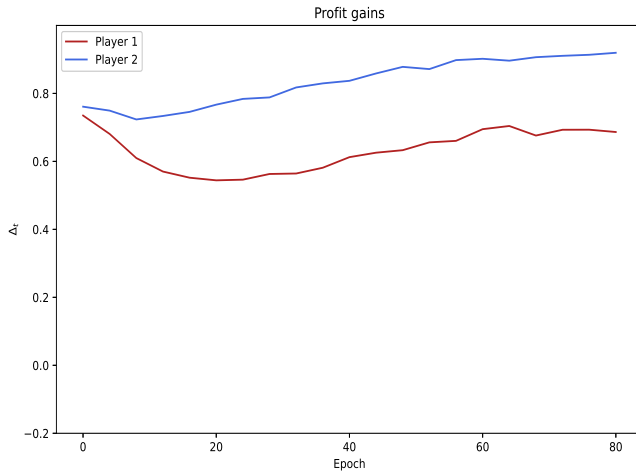
Samarbeid?



Profitt uten kapasitetsbegrensning



Profitt med kapasitetsbegrensning og rasjonering



Konklusjon

- Vi finner stor variasjon i hva kunstig intelligens lærer ut fra hvilke instruksjoner vi gir den.
 - Per økonomisk teori forventer vi at det er mange mulige stabile priser.
 - Resultatene våre varierer imidlertid også en hel del ut fra hvilke instruksjoner vi gir Klen.
- Vi er ikke helt overbevist om at strategiene vi observerer faller innenfor teoretiske definisjoner i litteraturen.
- I to tilfeller observerer vi høyere priser enn i Calvano mfl. 2020.



Litteratur I

-  Asker, John, Chaim Fershtman og Ariel Pakes (2024). «The impact of artificial intelligence design on pricing». I: *Journal of Economics & Management Strategy* 33.2, s. 276–304. DOI: <https://doi.org/10.1111/jems.12516>.
-  Assad, Stephanie mfl. (2024). «Algorithmic Pricing and Competition: Empirical Evidence from the German Retail Gasoline Market». I: *Journal of Political Economy* 132.3, s. 723–771. DOI: [10.1086/726906](https://doi.org/10.1086/726906).
-  Banchio, Martino og Giacomo Mantegazza (2022). *Adaptive Algorithms and Collusion via Coupling*. Tekn. rapp. SSRN, s. 1–57. URL: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4032999>.
-  Banchio, Martino og Andrzej Skrzypacz (2022). *Artificial Intelligence and Auction Design*. arXiv: [2202.05947](https://arxiv.org/abs/2202.05947) [econ.TH]. URL: <https://arxiv.org/abs/2202.05947>.
-  Benoit, Jean-Pierre og Vijay Krishna (1987). «Dynamic Duopoly: Prices and Quantities». I: *The Review of Economic Studies* 54.1, s. 23–35. DOI: [10.2307/2297443](https://doi.org/10.2307/2297443).








Litteratur II

-  Bloembergen, Daan mfl. (mai 2015). «Evolutionary Dynamics of Multi-Agent Learning: A Survey». I: *Journal of Artificial Intelligence Research* 53.1, s. 39. ISSN: 1076-9757. DOI: [10.1613/jair.4818](https://doi.org/10.1613/jair.4818).
-  Brock, William A. og José A. Scheinkman (1985). «Price Setting Supergames with Capacity Constraints». I: *The Review of Economic Studies* 52.3, s. 371–382. DOI: [10.2307/2297659](https://doi.org/10.2307/2297659).
-  Brown, Zach Y. og Alexander MacKay (mai 2023). «Competition in Pricing Algorithms». I: *American Economic Journal: Microeconomics* 15.2, s. 109–56. DOI: [10.1257/mic.20210158](https://doi.org/10.1257/mic.20210158). URL: <https://www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/mic.20210158>.
-  Calvano, Emilio, Giacomo Calzolari, Vincenzo Denicoló mfl. (2021). «Algorithmic collusion with imperfect monitoring». I: *International Journal of Industrial Organization* 79, s. 102712. ISSN: 0167-7187. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijindorg.2021.102712>.







Litteratur III

-  Calvano, Emilio, Giacomo Calzolari, Vincenzo Denicolò mfl. (okt. 2020). «Artificial Intelligence, Algorithmic Pricing, and Collusion». I: *American Economic Review* 110.10, s. 3267–97. DOI: [10.1257/aer.20190623](https://doi.org/10.1257/aer.20190623).
-  Chen, Le, Alan Mislove og Christo Wilson (2016). «An Empirical Analysis of Algorithmic Pricing on Amazon Marketplace». I: *Proceedings of the 25th International Conference on World Wide Web*, s. 1339–1349. DOI: [10.1145/2872427.2883089](https://doi.org/10.1145/2872427.2883089).
-  Davidson, Carl og Raymond Deneckere (1986). «Long-Run Competition in Capacity, Short-Run Competition in Price, and the Cournot Model». I: *The RAND Journal of Economics* 17.3, s. 404–415. ISSN: 07416261. URL: <http://www.jstor.org/stable/2555720>.
-  Edgeworth, Francis Y. (1925). «The Pure Theory of Monopoly». I: *Papers Relating to Political Economy*. Macmillan, s. 111–142. URL: <https://www.hetwebsite.net/het/texts/edgeworth/edgewpapers/edgew1e.pdf>.
-  Eschenbaum, Nicolas, Filip Mellgren og Philipp Zahn (2022). *Robust Algorithmic Collusion*. arXiv: 2201.00345 [econ.GN]. URL: <https://arxiv.org/abs/2201.00345>.





Litteratur IV

-  Ezrachi, Ariel og Maurice E. Stucke (2016). «Virtual competition». I: *Journal of European Competition Law and Practice* 7.9, s. 585–586. ISSN: 20417772. DOI: [10.1093/jeclap/lpw083](https://doi.org/10.1093/jeclap/lpw083).
-  Harrington, Joseph E (jan. 2019). «Developing Competition Law for Collusion by Autonomous Agents». I: *Journal of Competition Law Economics* 14.3, s. 331–363. ISSN: 1744-6414. DOI: [10.1093/joclec/nhy016](https://doi.org/10.1093/joclec/nhy016).
-  Klein, Timo (2021). «Autonomous algorithmic collusion: Q-learning under sequential pricing». I: *The RAND Journal of Economics* 52.3, s. 538–558. DOI: <https://doi.org/10.1111/1756-2171.12383>.
-  Kreps, David M. og José A. Scheinkman (1983). «Quantity Precommitment and Bertrand Competition Yield Cournot Outcomes». I: *The Bell Journal of Economics* 14.2, s. 326–337. ISSN: 0361915X. URL: <http://www.jstor.org/stable/3003636>.



Litteratur V

-  Mehra, Salil K. (2016). «Antitrust and the robo-seller: Competition in the time of algorithms». I: *Minnesota Law Review* 100.4, s. 1323–1375. ISSN: 00265535. URL: https://www.minnesotalawreview.org/wp-content/uploads/2016/04/Mehra_ONLINEPDF1.pdf.
-  Osborne, Martin J og Carolyn Pitchik (1986). «Price competition in a capacity-constrained duopoly». I: *Journal of Economic Theory* 38.2, s. 238–260. ISSN: 0022-0531. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-0531\(86\)90117-1](https://doi.org/10.1016/0022-0531(86)90117-1).
-  Silver, David, Aja Huang mfl. (jan. 2016). «Mastering the Game of Go with Deep Neural Networks and Tree Search». I: *Nature* 529.7587, s. 484–489. ISSN: 14764687. DOI: [10.1038/nature16961](https://doi.org/10.1038/nature16961).
-  Silver, David, Thomas Hubert mfl. (2018). «A general reinforcement learning algorithm that masters chess, shogi, and Go through self-play». I: *Science* 362.6419, s. 1140–1144. ISSN: 10959203. DOI: [10.1126/science.aar6404](https://doi.org/10.1126/science.aar6404).



Litteratur VI



Spann, Martin mfl. (2024). *Algorithmic Pricing: Implications for Consumers, Managers, and Regulators*. Tekn. rapp. 32540. National Bureau of Economic Research, s. 1–60.
DOI: [10.3386/w32540](https://doi.org/10.3386/w32540).

